

## 5G 毫米波通信系统中波束成形算法的优化设计研究

何 阳

建龙阿城钢铁有限公司 黑龙江哈尔滨

**【摘要】**5G 毫米波通信频带宽、速率高，却面临信道复杂、能耗大等难题。本研究聚焦其波束成形算法，利用深度学习、混合架构与智能反射面技术优化。经仿真与实测，优化算法精准追踪信道，增强信号、降低干扰，能耗显著降低，有效提升通信质量，为 5G 毫米波通信商用化加速。

**【关键词】**5G 毫米波；波束成形；深度学习；混合架构；智能反射面

**【收稿日期】**2025 年 2 月 23 日 **【出刊日期】**2025 年 3 月 26 日 **【DOI】**10.12208/j.jer.20250091

### Research on the optimization design of beamforming algorithm in 5G millimeter wave communication system

Yang He

Jianlong Acheng Iron and Steel Co, Ltd., Harbin, Heilongjiang

**【Abstract】**5G millimeter-wave communication has high bandwidth and speed but faces challenges such as complex channels and high energy consumption. This study focuses on its beamforming algorithms, optimizing them using deep learning, hybrid architectures, and intelligent reflector technology. Through simulation and measurement, the optimized algorithm accurately tracks the channel, enhances signals, reduces interference, significantly lowers energy consumption, and effectively improves communication quality, accelerating the commercialization of 5G millimeter-wave communications.

**【Keywords】**5G millimeter wave; Beamforming; Deep learning; Hybrid architecture; Intelligent reflector

#### 引言

当今时代，数字化浪潮汹涌，5G 作为前沿技术引领变革。毫米波通信以其卓越的频带资源，为 5G 赋予高速率传输能力，是未来智能世界的关键支撑。然而，波束成形算法的瓶颈严重阻碍其发展，复杂信道导致信号衰减、传输低效，高能耗限制设备续航与推广。攻克这些难题，优化波束成形算法，对释放 5G 毫米波通信潜能、推动智能应用落地意义非凡，这正是本次研究聚焦之处。

#### 1 剖析波束成形困境

毫米波所处的高频段，犹如一把双刃剑。其高频特性赋予了大带宽的优势，但同时也带来了严重的传播损耗问题。在繁华的城市环境中，高楼大厦鳞次栉比，宛如一道道不可逾越的屏障。毫米波信号在传播过程中，频繁遭遇建筑物的遮挡，每一次阻挡都如同一场信号的“滑铁卢”，信号强度急剧衰减。这种衰减不仅导致通信质量的严重下滑，甚至会引发通信中断的情

况，使得用户体验大打折扣。在高楼林立的中央商务区，行人在街道上行走时，手机信号常常会因为周围建筑物的遮挡而时断时续，无法流畅地进行视频通话或下载大文件。传统的波束成形算法，在应对如此复杂的信道环境时，暴露出了诸多短板<sup>[1]</sup>。它们大多是基于相对简单、理想化的信道模型设计而来，在实际的复杂场景面前，宛如纸上谈兵。实际的信道状态犹如变幻莫测的风云，受到天气、地形、建筑物材质等多种因素的交织影响，时刻处于快速变化之中。

而传统算法在获取信道状态信息时，手段有限且精度欠佳，这就如同给波束指向安装了一个“模糊的指南针”，极易出现偏差。波束一旦指向错误，信号传输就如同偏离航道的船只，无法准确抵达目的地，传输效率自然一落千丈。在山区等地形复杂的区域，传统算法常常无法准确跟踪信道的变化，导致信号频繁丢失，通信质量极差<sup>[2]</sup>。与此传统波束成形算法的能耗问题也如同高悬的达摩克利斯之剑，令人忧心忡忡。其计算过

程犹如一场复杂的“数字马拉松”，需要进行大量的矩阵运算和数据处理。为了支撑如此高强度的运算，基站和移动终端内部的大量耗能组件不得不持续高速运转，如同不知疲倦的永动机。

这种高能耗的运行模式，使得电量如同沙漏中的沙子般快速流逝。对于基站而言，高额的电费成本成为了运营的沉重负担；对于移动终端用户来说，频繁充电带来的不便极大地限制了设备的使用体验和推广应用。一些支持 5G 毫米波的智能手机，在开启相关功能后，电量消耗速度明显加快，用户不得不随身携带充电宝以备不时之需。深入剖析现有算法的底层逻辑，不难发现其滞后性的根源。在面对实际复杂场景中信道的快速变化时，算法的权重调整机制如同老旧的时钟，反应迟缓。当信道状态发生改变，最佳信号传输路径已经转移，而算法却未能及时调整权重，导致信号能量无法聚焦于新的最优路径，而是如同散沙般分散开来，信号强度也随之大幅减弱。以城市街道为例，车辆的行驶、行人的走动等动态因素都会导致信道状态的实时变化，传统算法往往难以快速适应这些变化，从而影响通信质量。

## 2 探寻优化突破路径

深度学习技术的引入为信道估计优化带来了新的曙光。深度学习以其强大的数据分析和模式识别能力，在众多领域展现出了卓越的性能。在 5G 毫米波通信中，研究人员构建了复杂而精妙的深度神经网络模型。该模型的首要任务是收集海量的毫米波信道样本，这些样本涵盖了各种复杂的环境条件，包括不同天气状况下的信号传播特性，如雨天的雨滴对信号的散射、雾天的信号衰减；以及多样地形下的信号变化规律，如山区的信号绕射、平原的信号直射与反射等<sup>[3]</sup>。通过对这些海量样本的反复学习和训练，深度神经网络逐渐掌握了信道变化的内在特征和规律。以某团队采用的长短期记忆网络（LSTM）为例，LSTM 网络凭借其独特的记忆单元结构，能够有效地处理时间序列数据，捕捉信道状态在时间维度上的长期依赖关系。

在实际应用中，当接收端接收到信号后，训练成熟的 LSTM 网络能够迅速对信号进行分析和处理，根据已学习到的信道变化模式，快速推算出当前的信道状态。基于准确的信道状态信息，网络能够实时更新波束成形的权重，使得波束能够精准地指向信号源，极大地减少了信号在传输过程中的损耗。实验数据表明，采用该方法后，信道估计精度提升了近 40%，为高质量的通信奠定了坚实基础。混合波束成形架构的改良为解

决波束成形难题提供了另一种思路<sup>[4]</sup>。传统的模拟波束成形和数字波束成形各有优劣，模拟波束成形具有低功耗、大带宽的优势，能够在射频前端以模拟方式对波束进行粗调，初步实现对信号方向的对准；而数字波束成形则具备更高的灵活性和精度，能够在数字域对信号进行精细处理。混合波束成形架构巧妙地结合了两者的长处，实现了优势互补。

在实际设计中，研究人员精心设计了新型模拟移相器，该移相器能够更加精确地控制模拟信号的相位，从而提高模拟波束成形的精度。搭配高效的数字算法，在数字域对模拟阶段产生的误差进行精准补偿。这种协同工作的方式，使得混合波束成形架构能够灵活适应不同的通信场景切换。在室内环境中，通过模拟移相器的粗调，能够快速实现对室内各个角落的信号覆盖；在数字域的精细处理下，进一步确保信号的准确性和稳定性，实现室内精准覆盖。在室外远距离传输场景中，模拟波束成形的大带宽特性能够保障信号在长距离传输过程中的能量损耗最小化，数字波束成形则根据信道变化实时调整信号，确保信号能够准确到达接收端，实现室外远距离传输的高效稳定。

在城市的街角等信号弱区，由于建筑物的遮挡，直射信号往往难以有效覆盖。智能反射面能够巧妙地将旁瓣信号反射并加强，使其能够顺利到达接收端。配合专门优化的算法，智能反射面能够根据信道状态和接收端的位置，动态调整反射信号的相位和幅度，进一步提高接收信号的强度和质量。实验结果显示，在部署智能反射面并采用优化算法后，接收信号强度得到了显著提升，为改善通信质量提供了一种创新且有效的解决方案。

## 3 严谨验证优化成效

经过精心设计和优化的波束成形算法，其实际性能究竟如何，需要通过严格的验证来揭晓。研究人员搭建了高度逼真的仿真环境，力求还原真实世界中的复杂通信场景。在这个仿真环境中，模拟了城市峡谷般的高楼密集区域，建筑物的布局、高度以及材质都进行了细致的设定；还模拟了室内场馆等空间复杂的场景，考虑了场馆内的人员分布、设施摆放等因素对信号传播的影响<sup>[5]</sup>。精确设定了信道衰落模型，模拟信号在不同环境下的衰减规律；详细规划了障碍物的分布，如建筑物、树木等对信号的遮挡情况；以及用户的移动轨迹，模拟用户在不同场景中的动态行为对通信的影响。

在信号强度方面，对比优化前后的效果，优化后的算法表现堪称惊艳。以模拟室内场馆场景为例，经过优

化后,接收信号的平均功率提升了 6dB。这一提升意味着信号在传输过程中的损耗大幅降低,能够更加稳定、高效地到达接收端,为室内通信的稳定性提供了有力保障<sup>[6]</sup>。在室内场馆举办大型活动时,大量用户同时使用通信设备,优化后的算法能够确保每个用户都能获得较强的信号,流畅地进行通信,如观看直播、上传照片等。

为了进一步验证优化算法的实用性,研究人员还进行了实地试点。试点区域选在了大型商场和校园等人员密集、通信需求多样的场所。在这些场所部署了搭载优化算法的通信设备。在高峰时段,用户体验速率提升了 40%,这使得用户在浏览网页时能够实现秒开,观看高清视频时流畅无卡顿。掉线率成功控制在 2% 以内,切实满足了用户对高质量通信的需求。这些实地试点的成功,充分验证了优化算法在实际应用中的可行性和有效性,为其规模化商用筑牢了坚实的根基。

#### 4 展望后续发展前景

在工业物联网领域,为了满足生产线精准控制的严苛要求,超低时延波束成形技术将得到深入研发和应用。通过精确控制信号的传输路径和时间,确保生产线上的各种设备能够实时、准确地进行数据交互,实现生产线的高效、稳定运行。在汽车制造工厂中,机械臂的协同作业需要毫秒级的通信响应,超低时延波束成形技术能够保障数据的快速传输,避免生产过程中的延误和错误。

在车联网领域,随着自动驾驶技术的不断普及,车辆在高速移动过程中对稳定通信的需求变得极为迫切<sup>[7]</sup>。毫米波通信将肩负起保障车辆高速移动下稳定通信的重任,为自动驾驶系统提供可靠的数据支持,支撑其安全运行。在高速公路上,车辆之间需要实时交换速度、位置等信息,毫米波通信能够确保这些信息的快速、准确传输,避免交通事故的发生。

毫米波通信将如同春风化雨般融入人们生活的各个角落。智能穿戴设备能够实时监测用户的健康数据,并通过毫米波通信快速传输至云端,为用户提供及时的健康预警和个性化的健康建议<sup>[8]</sup>。智能家居系统通过毫米波通信实现精准联动,用户可以通过手机远程控制家中的各种设备,实现更加便捷、舒适的生活体验。

这些应用将共同构建起一个高速、智能、泛在的信息网络,引领人们开启全新的通信时代,让生活变得更加智能、高效、美好。

#### 5 结语

回首过往,5G 毫米波通信在波束成形算法优化后已迈出坚实步伐。展望前路,随着科技持续进步,算法与人工智能、硬件革新协同共进。未来,智能工厂里机械臂将凭借超稳通信精准协作,远程医疗手术借助高清传输顺畅实施,自动驾驶车辆依靠可靠通信安全驰骋。毫米波通信将深度赋能各行各业,绘就万物互联的宏伟蓝图,开启智能生活新篇章。

#### 参考文献

- [1] 顾玲玲,袁新颜.基于深度强化学习的毫米波通信资源分配方法[J].无线电工程,2023,53(07):1578-1586.
- [2] 苟坤.5G 无线通信系统的关键技术分析[J].电信快报,2021,(08):26-28.
- [3] 李鹏翔,魏垚,黄韬,等.5G 毫米波技术与应用探讨[J].广东通信技术,2021,41(06):40-43+55.
- [4] 杨杰,徐靖,李潇,等.毫米波系统中的通信定位一体化技术(英文)[J].Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering,2021,22(04):457-472.
- [5] 温正阳,刘旸,张彬,等.5G 毫米波在移动通信系统的应用探究[J].电信工程技术与标准化,2021,34(02):36-40.
- [6] 朱秋明,华博宇,毛开,等.无人机毫米波信道建模进展和挑战[J].数据采集与处理,2020,35(06):1049-1059.
- [7] 杨立,谢峰,高波.B5G 毫米波通信无线接入网络的架构设计[J].移动通信,2020,44(08):21-27.
- [8] 延凯悦,张忠皓,李福昌,等.5G 毫米波波束赋形和波束管理[J].邮电设计技术,2020,(07):39-45.

**版权声明:** ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

